

学校编码: 10384
学号: 22320120153459

密级_____

廈門大學

博 士 学 位 论 文

自然变动与外部强迫对区域性海平面变化的影响

Impacts of natural variability and external forcing on
regional sea level change

吕柯伟

指导教师姓名: 胡建宇 教授

Xuebin Zhang

John A. Church

专 业 名 称: 物理海洋学

论文提交日期: 2015 年 11 月

论文答辩时间: 2015 年 11 月

2015年12月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文， 于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目 录

摘要.....	I
Abstract	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 影响当代海平面变化的因素.....	1
1.2.1 全球平均海平面变化	2
1.2.2 区域性海平面变化	3
1.3 海平面变化的历史记录及未来预估.....	4
1.3.1 历史记录	4
1.3.2 未来预测	10
1.4 研究动机.....	12
1.5 本文研究.....	15
第 2 章 区域性海平面变化显明的时间.....	17
2.1 引言.....	17
2.2 数据.....	17
2.3 方法.....	20
2.3.1 从单个气候模式中估计显明时间	20
2.3.2 海平面自然变动的范围	23
2.3.3 阈值和参考时间选取对显明时间结果的影响	23
2.3.4 计算多模式集合中值及 16–84% 不确定性范围	25

2.4 结果.....	26
2.4.1 海平面自然变动	26
2.4.2 区域性海平面变化显明的时间	29
2.4.3 海平面与表层气温显明时间比较	38
2.5 小结与讨论.....	41
第 3 章 量化气候系统内部产生及外部强迫的区域性气候信号	42
3.1 引言	42
3.2 数据和方法	43
3.3 结果.....	44
3.3.1 方法敏感性测试	44
3.3.2 外部强迫方差比率的空间分布	46
3.3.3 全球平均外部强迫方差比率的时间演化	54
3.3.4 区域性分析	57
3.4 小结与讨论.....	59
第 4 章 评估气候模式对太平洋海表温度和海平面年代际变动的模拟	62
4.1 引言	62
4.2 数据	66
4.3 方法	67
4.4 结果.....	68
4.4.1 太平洋海表温度年代际变动	68
4.4.2 太平洋海平面年代际变动	73
4.4.3 相关的大气场分布	79
4.4.4 气候模式常见偏差的起因	81

4.5 小结与讨论	86
第 5 章 太平洋海平面十年际变动的传播特征及机制.....	88
5.1 引言	88
5.2 数据	88
5.3 方法	89
5.3.1 统计学方法	89
5.3.2 线性罗斯贝波模型	90
5.4 结果	90
5.4.1 太平洋海平面变动年代际、十年际和多年代际时间尺度上的主要模态	90
5.4.2 太平洋海平面十年际变动的传播特征	94
5.4.3 风场与海平面之间统计与动力学联系	102
5.5 小结与讨论	106
第 6 章 总结与展望	108
6.1 论文总结	108
6.2 未来展望	109
参考文献	111
致谢	128
发表及完成的论文情况	130

Table of contents

Abstract (Chinese).....	I
Abstract	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research background	1
1.2 Contributing factors to the contemporary sea level change	1
1.2.1 Global mean sea level change	2
1.2.2 Regional sea level change	3
1.3 Historical records and future projections of sea level change.....	4
1.3.1 Historical records.....	4
1.3.2 Future projections.....	10
1.4 Research motivations	12
1.5 About this thesis	15
Chapter 2 Time of emergence for regional sea level change.....	17
2.1 Introduction	17
2.2 Data	17
2.3 Methodology	20
2.3.1 Estimate the time of emergence from individual climate models	20
2.3.2 The range of natural sea level variability	23
2.3.3 Sensitivity of time of emergence estimation to threshold and reference time	23
2.3.4 Calculate multi-model ensemble median and 16–84% uncertainty range	25
2.4 Results	26
2.4.1 Natural sea level variability	26

2.4.2 Time of emergence for regional sea level change	29
2.3.3 Comparison between results for sea level and surface air temperature.....	38
2.5 Conclusions and discussion.....	41

Chapter 3 Quantifying internally-generated and externally-forced climate

signals at regional scales	42
3.1 Introduction	42
3.2 Data and methodology	43
3.3 Results	44
3.3.1 Sensitivity test of the method	44
3.3.2 Spatial patterns of externally-forced variance ratio	46
3.3.3 Time evolution of globally averaged externally-forced variance ratios.....	54
3.3.4 Regional analysis.....	57
3.4 Conclusions and discussion.....	59

Chapter 4 Evaluation of the interdecadal variability of sea surface temperature and sea level in the Pacific in climate models

4.1 Introduction	62
4.2 Data	66
4.3 Methodology	67
4.4 Results	68
4.4.1 Interdecadal SST variability in the Pacific	68
4.4.2 Interdecadal sea level variability in the Pacific	73
4.4.3 The associated atmospheric patterns	79
4.4.4 The origins of common biases in climate models	81
4.5 Conclusions and discussion.....	86

Chapter 5 Propagating features and mechanisms of the decadal sea level variability in the Pacific	88
5.1 Introduction	88
5.2 Data	88
5.3 Methodology	89
5.3.1 Statistical methods	89
5.3.2 Linear Rossby wave model	90
5.4 Results	90
5.4.1 The dominant modes of sea level variability in the Pacific on interdecadal, decadal and multidecadal timescales	90
5.4.2 Propagating features of the decadal sea level variability in the Pacific	94
5.4.3 Statistical and dynamical linkages between the wind and sea level	102
5.5 Conclusions and discussion	106
Chapter 6 Summary and outlook	108
6.1 Summary	108
6.2 Outlook	109
References	111
Acknowledgments	128
Published or completed papers during the study	130

摘要

全球平均海平面正在上升，预测在未来还会继续上升。海平面变化在空间上并不是均匀一致的，人们更关心的是区域性海平面变化。然而，区域性海平面往往表现出相当大的气候系统内部产生的自然变动，这使得外部强迫（包括温室气体、气溶胶等人为因素，火山爆发、太阳循环等自然因素）引起的区域性海平面变化不甚明显，同时也为未来区域性海平面变化预测带来很大的不确定性。

基于参加耦合模式比较计划第五阶段（CMIP5）的气候模式，设计了两种方法来衡量区域性尺度上外部强迫引起的海平面变化信号与海平面自然变动信号的相对强度，并将这两种方法应用于表层气温数据来比较大气与海洋之间的响应差异。第一种方法估计了气候变化信号超出自然变动范围进而显现出来的时间（称为显现时间）。基于三套预测至 2100 年的海平面数据（包含的过程逐渐增多），用 1986–2005 年的平均海平面作为参考，估计了区域性海平面变化的显现时间。截止至 21 世纪末，海洋密度和环流变化引起的动力学海平面变化只在有限的区域内显现。通过加入全球海洋热膨胀效应，多模式集合中值结果表明 50% 海域的海平面上升在本世纪 40 年代初至中期前显现。加入陆冰质量损失、陆地水储量变化和冰川均衡调整等因素增强了大部分海域的海平面上升信号（小部分海域海平面下降），导致超过 50% 的海域在 2020 年之前海平面上升显现。海平面变化的显现时间显著早于表层气温变暖的显现时间，并且在不同温室气体排放方案下差异很小，这意味着：比起表层气温变暖，海平面变化及其潜在影响将被人类更早地察觉到。

第二种方法运用了方差分析手段，从提供有限数目集合模拟的 CMIP5 模式中，将气候信号总方差分为气候系统内部产生的（即自然变动）与外部强迫的（包括人为和自然因素）两个部分；进而量化区域性表层气温与海平面外部强迫信号的方差占年际及更长时间尺度总方差的比率。表层气温的该比率最大值存在于热带区域；考虑海洋动力学和全球平均热比容变化，在历史时期内（1860–2005 年）海平面该比率最大值出现在高纬度海域。一个固定的时间间隔内（例如 30 年），在温室气体高排放的气候情景（RCP8.5）下，预测的表层气温和海平面全球平均比率在 21 世纪内持续增大。相反，在温室气体排放减少的两个气候情景（RCP2.6 和 RCP4.5）下，表层气温的全球平均外部强迫方差比率至 21 世纪末显著下降，但对于海平面仅为略微下降或趋于稳定，这表明海平面对温室气体减排的响应较慢。

卫星高度计海平面观测资料的时间长度仅为二十年左右（自 1993 年起），此期间太平洋区域性海平面变化趋势可大部归因于海盆尺度年代际气候变动，尽管还不确定其中是否包含外部强迫信号。因此本文的另一个研究重点是太平洋海平面大尺度年代际变动（周期大于 7 年）。利用目前可用的、基于观测的产品，本文评估了参加耦合模式比较计划第三和第五阶段的气候模式（CMIP3 和 CMIP5）对太平洋年代际变动主要模态，即年代际太平洋振荡（IPO），的模拟能力。结果表明：与 CMIP3 模式相比，CMIP5 模式重现太平洋海表温度和海平面年代际变动空间结构的能力略胜一筹，且模式间差异较小。气候模式模拟的海表温度年代际变动空间结构较海平面年代际变动空间结构更为真实。CMIP3 和 CMIP5 模式在热带太平洋西北部存在缺陷，该海域的观测资料显示出与 IPO 相关的大幅度海平面变动，但气候模式模拟的海平面变动幅度相较极弱或者更甚给出相反的信号，这些偏差主要与对应纬度（12°N 左右）风场的不准确模拟有关。耦合气候模式中海气耦合过程可能对年代际风场模拟的偏差起到一定作用，且气候模式中气候平均态的模拟可能会影响年代际变动空间结构的模拟。所示气候模式评估信息有助于进一步研究太平洋年代际气候变动，以及更好地分辨气候变化信号。

最后，利用地球模拟器海洋环流模式（OFES）的后报模拟（1950–2011 年）以及海洋再分析产品和气候模式，进一步研究太平洋海平面年代际变动的特征与机制。首先将年代际信号中的十年际信号（7–30 年）和多年代际信号（大于 30 年）区分出来。由于数据长度和质量限制，仅重点分析太平洋海平面在十年际时间尺度上的变动。应用一系列基于正交函数分析的统计方法，得到了主要周期为 12 年左右的太平洋海平面十年际变动，及其在整个海盆尺度内以向西为主的传播特征和对应的风场结构。包括局地埃克曼泵吸和第一斜压罗斯贝波传播过程的线性罗斯贝波模型可以较好地解释某些海域海平面的十年际变动，尤其是在亚热带太平洋海域。得到的太平洋海平面十年际变动传播特征和机制为年际和年代际尺度区域性海平面的可预报性提供了有用的信息。

关键词：区域性海平面变化；气候模式；自然变动；外部强迫；年代际变动；斜压罗斯贝波

Abstract

Global mean sea level has been rising and projected to rise further in the future. Sea level changes are not spatially uniform, it is the local sea level changes that the local communities directly experience and care more about. However, the regional sea level usually exhibits considerable natural variability that is internally generated within the climate system, obscuring regional sea level change due to external forcings (e.g., anthropogenic forcings such as greenhouse gases and aerosols, natural forcings such as volcanic eruption and solar cycle) and also causing large uncertainties for future regional sea level projections.

Based on climate models from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), two methods were designed to measure the relative magnitude of the externally-forced sea level change signal and the natural sea level variability at regional scales. Both methods were also applied to surface air temperature for comparing the response differences between ocean and atmosphere. The first method was to determine the time when the climate change signal exceeds and thus emerges from the range of natural variability (referred to as the Time of Emergence, ToE). Based on three regional sea level projection datasets available to 2100, which have increasing complexity in terms of included processes, the ToE for regional sea level changes relative to the reference period 1986–2005 was estimated. The dynamic sea level derived from ocean density and circulation changes alone leads to emergence over only limited regions until the end of 21st century. By adding the global-ocean thermal expansion effect, the multi-model ensemble median results indicate that 50% of the ocean area will show emergence with rising sea level by the early-to-middle 2040s. Including additional contributions from land ice mass loss, land water storage change and glacial isostatic adjustment generally enhances the signal of regional sea level rise (except in some regions with decreasing sea levels), which leads to emergence over more than 50% of the ocean area by 2020. The ToE for total sea level is substantially earlier than that for surface air temperature and exhibits little dependence on the emission scenarios, which means that our society will face detectable sea level change and its potential impacts earlier than surface air warming.

The second method was applying a variance analysis method to partition the total variance of climate signal into internally-generated (i.e., natural variability) and externally-forced (both anthropogenic and natural factors) parts from CMIP5 models with multiple but limited ensemble simulations. Then the ratio of externally-forced variance to total variance

on interannual and longer time scales for regional surface air temperature and sea level was quantified. The highest ratios were found in tropical areas for surface air temperature, but at high latitudes for sea level over the historical period (1860–2005) when ocean dynamics and global mean thermosteric contributions are considered. Averaged globally, the ratios over a fixed time interval (e.g., 30 years) were projected to increase during the 21st century under the business-as-usual scenario (RCP8.5) for both surface air temperature and sea level. In contrast, the ratio declines sharply by the end of 21st century for surface air temperature under two mitigation scenarios (RCP2.6 and RCP4.5), but only declines slightly or stabilizes for sea level, indicating a slower response of sea level to climate mitigation.

Much of the regional sea level trend in the Pacific during the short altimeter era of about two decades (since 1993) can be roughly explained by the basin-scale interdecadal climate variability, although it is uncertain if there is still any externally-forced signal. Thus another emphasis of this thesis was about the large-scale interdecadal (>7 years) sea level variability in the Pacific. Based on currently available observation-based products, this thesis evaluated the ability of climate models participating in phases 3 and 5 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP3 and CMIP5) to simulate the dominant interdecadal variability mode in the Pacific, i.e., the Interdecadal Pacific Oscillation (IPO). The results indicate that compared with the CMIP3 models, the CMIP5 models exhibit slightly better performance in reproducing the observed interdecadal variability patterns of both sea surface temperature and sea level, and also exhibit smaller inter-model spread. Climate models tend to simulate more realistic interdecadal variability patterns for sea surface temperature than for sea level. A prominent deficiency among CMIP3 and CMIP5 models lies in the northwestern tropical Pacific, where the observations show large sea level variations associated with the IPO but the simulated variations are usually much weaker or even of the wrong sign. These biases can be generally associated with the inaccurate representation of wind forcing patterns at the corresponding latitudes ($\sim 12^{\circ}\text{N}$). The air-sea coupling may play a role in the bias of interdecadal wind patterns in coupled climate models, and the representation of climatological mean states in climate models could influence the simulated interdecadal variability patterns. The results provide necessary skill information on climate models for further studying the Pacific interdecadal variability, as well as for better distinguishing the climate change signal from natural climate variability.

Finally, the hindcast simulations from the Ocean general circulation model for the Earth Simulator (OFES) over 1950–2011, along with an ocean reanalysis product and a climate model with good performance, were used to further study features and mechanisms of the

interdecadal sea level variability in the Pacific. The decadal (7–30 years) and multidecadal (>30 years) signals of interdecadal sea level variability were discussed separately. However, due to limitations of data length and quality, our analysis was limited to the decadal time scale only. Basin-scale propagating features (mainly westward) of decadal sea level variability in the Pacific with the dominant period of ~12 years were derived from a series of statistical methods based on the Empirical Orthogonal Function analysis. The corresponding wind patterns were also identified. A linear Rossby wave model including the local Ekman pumping and propagations of the first baroclinic Rossby wave could explain the decadal sea level variability quite well in some regions, especially in the subtropical Pacific. The propagating features and mechanisms of decadal sea level variability identified here could provide useful information for interannual and decadal prediction of regional sea level in the Pacific.

Keywords: regional sea level change; climate model; natural variability; external forcing; interdecadal variability; baroclinic Rossby wave

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

地球系统的气候一直在不停地变化中。对地球气候系统各个成分的观测表明，自工业革命以来，人类活动对地球气候产生了显著的影响。由于化石燃料燃烧等人类行为，温室气体浓度增大，温室效应使得辐射强度增大，随之造成包括大气和海洋变暖、积雪和冰量减少以及海平面上升等后果（参见政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第五次评估报告决策者摘要：IPCC, 2013）。

沿海地区多是人口密度高、经济发达、高度城市化的区域，平均海平面以上十米以内的沿海区域仅占全球陆地面积的 2%，却容纳了全球 10% 的人口（McGranahan et al., 2007）。许多重要的基础建设，例如石油化工、核电站、港口及其它工业设施，往往集中在海岸线附近。在位于当代海平面以上一米之内 200 多万平方公里的陆地上，有超过一万亿美元价值的资产（Stern, 2007）。作为气候变化的重要议题及主要威胁之一，海平面上升对沿海地区会造成显著的、甚至灾难性的负面影响。例如，沿海湿地面积减少，生态系统遭到破坏；海岸受到侵蚀，土地逐渐盐碱化；咸海水入侵表层和地下水；平均海平面上升导致极端海平面事件变得更加频繁，沿海洪涝灾害加剧。

由于海平面上升在全球范围内并不是均匀一致的，因此只了解全球平均海平面的变化还不足够。为了帮助海岸带管理以及计划应对可能的极端海平面灾害，需要更好地理解区域性海平面变化的规律，同时提供对区域性海平面未来变化的预测。因此本文聚焦在区域性海平面变化。在这一章中，将首先介绍影响全球平均及区域性海平面变化的主要因素，然后总结海平面的各种观测手段和历史观测结果，以及目前对未来海平面变化的预测，最后讨论本文的研究动机和主要研究内容。

1.2 影响当代海平面变化的因素

作为一个多学科交叉的研究问题，海平面变化涉及到地球系统内部各个圈层之间的相互作用（图 1.1）。在这一节中，将详细介绍影响当代海平面变化的主要过程。

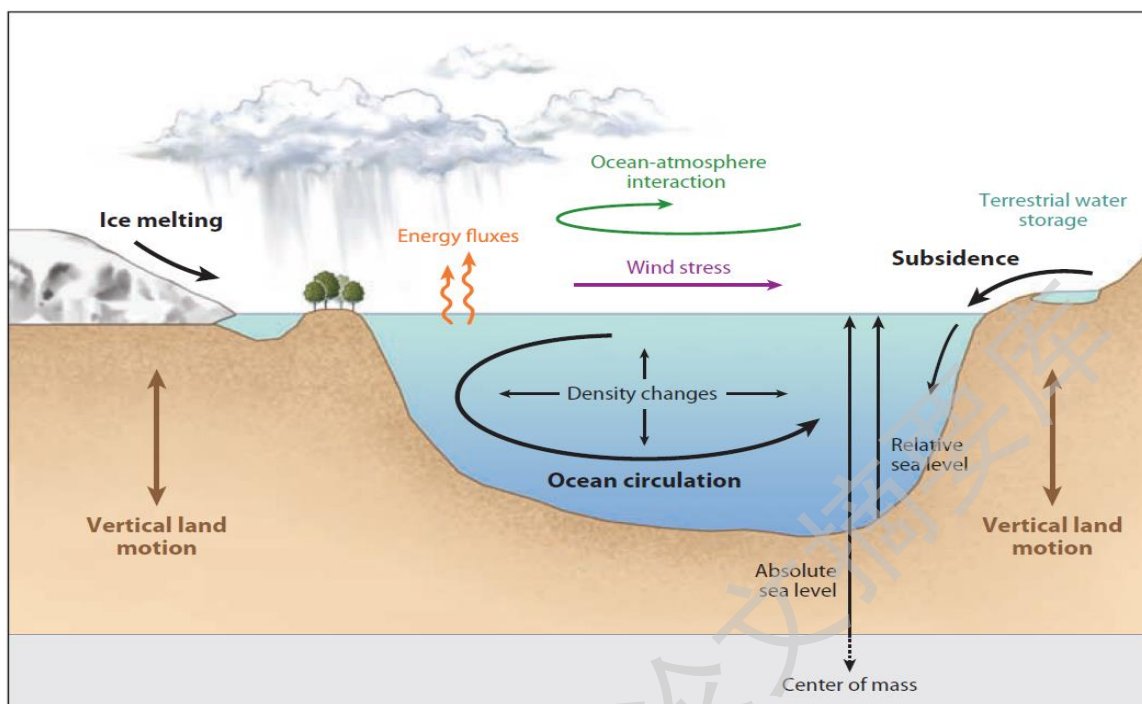


图 1.1 影响全球及区域海平面的主要过程 [引自 Stammer et al., 2013]。

Fig. 1.1 Main processes that influence global and regional sea level [adopted from Stammer et al., 2013].

1.2.1 全球平均海平面变化

全球平均海平面变化可以分为两个因素：海水体积变化和海水总质量变化。海水体积变化是由于温度和盐度变化引起的海水密度变化；海水质量变化是通过冰冻圈、陆圈和海洋之间冰与水的质量交换引起的，包括陆冰损失和陆地水储量变化等因素（Church et al., 2011b; Gregory et al., 2013）。

IPCC 第五次评估报告给出的主要结论之一：“气候系统的变暖是毋庸置疑的”。事实上全球变暖过程中大约 90% 以上的热量存储在海洋中（Church et al., 2011b），全球海洋吸收热量，密度减小从而导致海水热膨胀体积增大，全球平均海平面上升。盐度变化则具有相反的影响，盐度升高，密度增大，海水体积减小，海平面下降，但是盐度变化对全球平均海平面变化的影响非常小，以致几乎可以忽略（Gregory and Lowe, 2000）。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.